HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	氷河内滲透水の観測
Author(s)	若浜, 五郎; 黒岩, 大助; 小林, 大二 他
Citation	低温科學. 物理篇, 31, 209-220
Issue Date	1973-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18230
Type	departmental bulletin paper
File Information	31_p209-220.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Gorow WAKAHAMA, Daisuke KUROIWA, DaiJi KOBAYASHI, Kunio TANUMA, Yasoichi ENDÔ, Yukiko MIZUNO and Shunichi KOBAYASHI 1973 Observations of Permeating Water through a Glacier Body. *Low Temperature Science, Ser. A, 31.* (With English Summary p. 217)

氷河内滲透水の観測

若浜五郎
黒岩大助・小林大二・田沼邦雄
遠藤八十一・水野悠紀子・小林俊一
(低温科学研究所)

(昭和48年9月受理)

I. まえがき

近年，氷河流動の研究が進むにつれて，氷河の底と岩盤との間に存在する水の重要性が認識されて来た。僅か数mmの厚さの水が氷河の底面すべりを促進し，さらに氷河サージ（異常前進）をもひき起すといわれる[1]。

さらに最近は，氷河の内部にも融け水が滲透・流通していて，氷河の流動に重要な役割りを果していることが知られて来た。1968年3月上旬，筆者ら[2),3)]は南東アラスカのメンデンホール氷河下流域で，氷河内部に大量の水が存在することを見出した。水理学のボーリング孔法を用い，現場で氷河氷の透水係数kを求め，$k=6\times10^{-6}$ cm/secを得た。これは緻密なシルトの透水係数に相当する。

従来，氷河氷は通水性がないと思われていたが，実際にはこのように水が滲透・流通していることが確認されたのである。氷河全体が氷の融点にある温暖氷河では，表面から底にいたる全層にわたって，常に水が滲透・流下している可能性がある。最近，NyeとMae[4]は，氷内部に存在する結晶粒界の熱力学的考察を行ない，融点にある氷河氷では3ヶの結晶粒の境界(三叉粒界)に沿って水が流れうることを示し，実験でもそれを確認した。

このような氷河内部滲透水は，氷河の流動や氷河氷の結晶成長に重要な役割りを果すだけでなく，氷河の底面に達して氷河底面すべりにも寄与すると考えられる。しかし，氷河内部滲透水を実際の氷河で観測した例は，上記の筆者らによるものを除いて，ほとんど見当らない。

そこで，1971年，1972年の夏，日米科学協力事業でアラスカの氷河を調査した際に，再びメンデンホール氷河内部滲透水の挙動を調べた。また，北極圏アラスカの寒冷氷河のひとつ，マッコール氷河でも，氷河内部に滲透する水の実体を調査した。得られた観測結果を以下に報告する。

II. 氷河内部の滲透水の存在と毛管水路

メンデンホール氷河は，南東アラスカ，ジュノー市近郊にある典型的な温暖氷河である。

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1278号

1968年3月の観測結果と比較するため，1971年，1972年とも，1968年とほぼ同じ場所，氷河末端から約1km，左岸から約500mの場所を選んだ（図版-1）（文献2の第1図のS点附近に当る）。観測を行なったのは1971年は7月31日から8月4日，1972年は7月28日から8月2日の間の晴天の日である。日中，氷河上での気温は＋8～＋9°C，氷河表面の融解速度は平均7.5 cm/dayで，表面のあちこちに融け水が川をなして流れていた。

SIPRE型手廻し氷用オーガーで深さ3～3.5mの孔を掘り，氷のコア試料をとり出す。孔の中には，水が非常な勢いで湧き出し，数分のうちに孔をほぼ充たし，水位は表面下10～20 cmのところに落ち着いた。水位の上昇速度は1分間に50～100 cmに達し，1968年3月に観測された毎分1cm以下に比べると約100倍であった（この事については次節に詳しくのべる）。冬に比べて真夏には，いかに大量の水が氷河内部に含まれているかがわかる。このように大量の水は，一体，氷河内部のどこに，どういう状態で含まれているのだろうか。氷河表面でできた融解水は集まって川となり，あるものはクレバスに，あるものはムーラン（氷河の竪坑）に落ち込む。氷河の底に達した水の大部分は，氷河の下の岩盤上に川となって集まり，ついには氷河末端から迸流となって流出するのが見られる。

氷河に含まれる水に，氷河内部にあいた大きな空洞にたまった水がある。例えばFishersはアルプスの氷河にトンネルを掘った時，氷河表面下20～30mのところに，水が一杯たまった体積が1,000 m^3もある大きな空洞に遭遇した。類似の例がいくつか，他の氷河でも報告されている。

1968年3月および1971，1972年の夏に筆者らがボーリング孔内で観察した水は，明らかに，これら巨視的な通路を通って流れる水ではない。延べ10本のボーリングで得られたコアー試料を注意深く調べたが，表面から深さ数mの底までの間に，巨視的な水の通り路は全く見当らなかった。ボーリングの孔を上からのぞいてみると，孔の壁から水が，水鉄砲の水のように勢いよく迸り出し，氷河内部には細い水の通路が縦横に走っているように見えた。そこで，1971，1972の両年，メンデンホール，マッコール両氷河において，氷河内部の水の通路について調査した。

チェンソーで氷河に1.5 m×1.5 m，深さ50 cmの穴をほり，断面のひとつが氷河表面の最大傾斜線に垂直になるようにした。トーチランプであぶりながら断面を平らに仕上げると，断面を通して氷河の内部がすけて見える。断面の上流側約1mの表面上に青インクを散布すると，インクは氷の中の細い通路を通って氷河内部に浸透し，一部は表面にほぼ平行な面内を流れ，やがて断面に浸み出した。図版-2にその状況を示す。こうして表面の融け水が毛管水路や氷河内のある平面内を通って氷河内部を流れうることが直接観察された。

このことをさらに詳しく見るために，穴の壁から大きな氷のブロックを切り出し，氷河表面の上に立ててみた。初め氷のブロックは，多少の気泡は含むがほとんど透明な氷の塊であったが，やがて，氷の中に網状につながった太さ1～1.5 mmの毛管が見えてきた。氷と水の屈折率はほとんど等しいので，毛管の中に水が入っている時，毛管は見え難いが，中の水が外部に流れ出て空気に置きかわるため毛管がはっきりと見えてくるのである。黒布を氷のブロックの背後におくと，毛管は白く輝いて見える。図版-3の写真はこうしてとったもので，白く走

る細い管がそれである。

氷のブロックをしばらくの間太陽光線にさらしておくと，各結晶粒内には無数のチンダル像が発生し，また結晶粒界面がはっきりと見えてくる。これらチンダル像と結晶粒界面に照らして，毛管水路網を観察した結果，多くの毛管は，隣接した3ヶの単結晶粒のなす三叉粒界に沿って走っていることがわかった。これは，Nye と Mae[4] の研究結果と一致している。さらに氷のブロックから，厚さ数 mm の薄片試料を切り出し，部分偏光の下で観察したところ，三叉粒界に沿って毛管が走っているのが更に確かめられた。

これと同じ方法で，ボーリングで得られたコアー試料を調べた結果，毛管は単に氷河表面附近だけでなく，7～3 m の深さのボーリング孔の底近くの氷にも認められた。氷河内部には，とけ水を特によく通す平面状の層があることを上に述べた。このような層に直交する氷の薄片を切り出して偏光の下で調べたところ，粒径が非常に細かい層であることがわかった（図版-4 の F-F)。氷河内の剪断破砕帯と思われる片理面である。この層内では粒径が小さいので粒界面が発達し，従って，水路も発達するため水を通し易いものと考えられる。

以上の事から，氷河の内部には，主に結晶粒界に沿って太さが 1 mm ていどの毛管が縦横に走り，それを通って表面の融け水が氷河内部深く，多分底まで浸透通過できることがわかった。

III. 氷河氷の透水係数

上に述べたように，氷河に孔を掘ると，孔の壁から水がにじみ出して孔をほぼ満たし，孔の中に一定の水位を保つ。土壌の中に地下水が充ちているように，氷河の内部には水が充ち，氷河表面にほぼ平行な水位を保っているように見える。少し凹部になったところでは，特に水位が浅く，表面のごく近くまで水が充ちている。このような場所は，少し離れたところから見ると，表面が青く見えるのですぐに認められる。氷河表面には，あちこちに水たまりが見られる。これは水位が氷河表面より高くなった場所である。逆に，氷河上の馬の背状のリッジは水位が低く，表面が白っぽく見える。それでも，このあとでのべる観測点 B-2, 3 点は，リッジの上にあったにも拘らず，水位が表面下 45 cm のところに見られた。

このように氷河内部に浸透し，結晶粒間を充たしている水は，土壌粒子の間隙を充たす地下水と似ているので，仮に「氷河地下水」とよぶことにする。地中の飽和水が細かい土壌粒子の間隙を充たしているのに対し，氷河地下水は，直径が数 cm の氷の大きな結晶粒間の毛管を充たしているわけである。

土壌の性質を論ずるばあいの基本量に，土壌の透水係数がある。氷河氷体も水を通すので，水文学の類似で，氷河氷の透水係数を求める事は，氷河水文学の重要な課題のひとつであろう。

現場で土壌の透水係数を求める方法のうち，最も簡単で広く用いられているのにオーガー孔法がある。これは，オーガーで地中に孔を掘り，長時間孔から水を汲み出したのち孔の中の水位の上昇速度を測定することによって土の透水係数を求める方法である。Don Kirkham[6] のオーガー孔法の理論によると，透水係数 k (cm/sec) は次式で与えられる。

$$k = 0.617\,(r/sd)\cdot(\Delta h/\Delta t)$$

ここに r は孔の半径 (cm), d は地下水位下に掘られた孔の深さ (cm), Δh は時間 Δt 秒間に上昇する水位 (cm), s は d, h, r できめられる値である。

これを利用して，すでに 1968 年 3 月にメンデンホール氷河で氷の透水係数を求めたのであるが，今回もこの方法を利用して，真夏における氷河氷の透水係数を求めた。

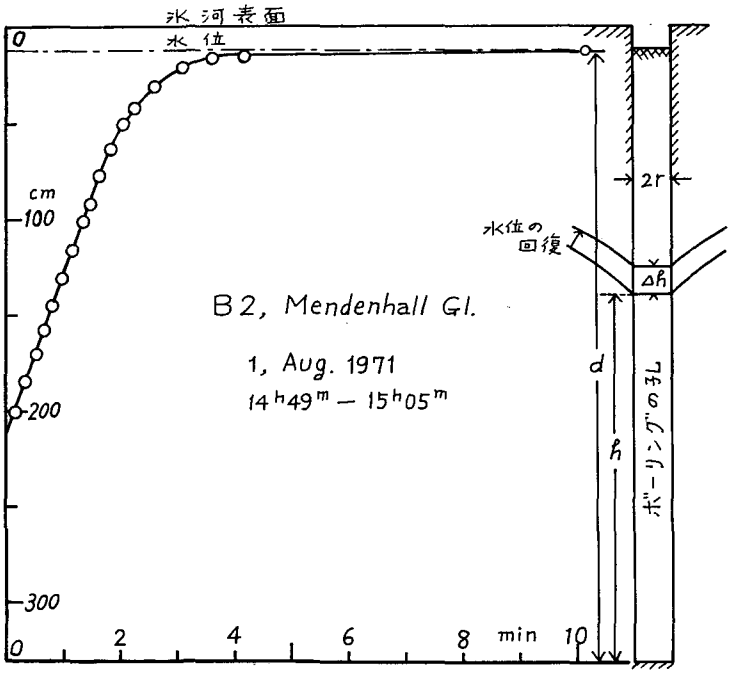
氷河表面は凹凸あり，クレバスあり，また，片理 (foliation)，成層構造が発達し，氷河氷の結晶粒の大きさも場所によってかなり異なる。この事を考慮しつつ，透水係数の観測点として次の 3 地点を選んだ。

B-1 点： 斜度 5° の平らな斜面。平均粒径 1～1.5 cm の比較的細かい結晶粒の領域。5 m ほど離れたところに，氷河の流れに平行な小クレバスが走っていた。

B-2 点： 扇状地状の場所の下手，斜度 5° の平らな斜面。平均粒径 5～6 cm の粗粒域。

B-4 点： 氷河の流れ方向にほぼ平行に走る馬の背（リッジ）の上。約 7 m 離れた所に，リッジに平行なクレバスが走っていた。平均粒径 6～7 cm の粗粒域。

SIPRE 型手廻しオーガー (内径 7.5 cm) で 3～3.5 m の孔 (直径 12 cm) をほり，コアー試料をとり出す。孔の中に湧き出した水を，特製の円筒状バケツを用いて丹念に汲み出し，孔の周縁の氷の中に含まれる水の除去につとめる。こうした後に，時々刻々の水位を測定する。一例として 1971 年 8 月 1 日，B-2 点で得られた結果を**第 1 図**に示す。水位が深さ 212 cm から 12 cm まで 200 cm を上昇するのに僅か 3 分余しかかからなかった。これを用いて求めた氷の



第 1 図 1971 年 8 月 1 日，B-2 点で測定したボーリング孔内の氷河地下水位の上昇。縦軸は氷河表面からの深さ，横軸は時間。右端にボーリング孔附近の氷体内における水位の回復を模式的に示した

透水係数は 3×10^{-3} cm/sec で，土壌でいえば，細かい砂の透水係数に相当する。

この B-2 点は平らな斜面にはあるが，30 m ほど上流側が，斜度のやや急な斜面になっているので，水が集まり易い地形である。氷河の上には，流れ方向にほぼ平行に馬の背状のリッジが何本も並んで走っている。このようなリッジは両側が低くなっているので，内部に水がないかも知れない。

そこで，このようなリッジの稜線上に B-4 点を選んでボーリングしたのであるが，予想に反して，孔には水が湧き出し，深さ 45.5 cm に安定水位をとった。この孔で観測した水位の上昇速度はほぼ 2 cm/min，透水係数は 2×10^{-4} cm/sec で，B-2 点よりは一桁小さい値であった。しかし，氷河の平らな場所であっても，また，リッジの上でも，地形に関係なしに，氷河の中に水が存在することが確かめられたわけである。

北極圏アラスカのブルックス山脈の中のマツコール氷河は，典型的な亜極地性寒冷氷河である。氷河内部の温度は，真夏の氷河消耗期でも，10 m の深さで −9°C であるが，表面から 1.5～2 m の深さまでは，0°C になっていて，水を含んでいる。1971 年 8 月 20 日，同氷河の末端近く，斜度 13° の割合一様な斜面に深さ 2 m のボーリングを行なったところ，深さ 140 cm に安定水位をもつ氷河地下水が見出された。水位の上昇速度から得られた氷の透水係数は 6×10^{-6} cm/sec で，メンデンホール氷河の値の数百分の 1 のていどであった。

さらに氷河に 1.5 m×1.5 m，深さ 1 m の穴を掘り，壁から約 30 cm 離れた氷河表面上にインクを散布したところメンデンホール氷河におけると同様，とけ水が氷河内部の毛管水路を通って流下するのが観察された。

これらマッコール氷河における観測は，寒冷氷河でも，夏の消耗期には，少なくとも表面下 2 m くらいまでの氷体内に水が浸透しうることを確かめたものである。

1971, 1972 両年にメンデルホール氷河で得られた氷河氷の透水係数，氷河地下水の水位などを**第 1 表**にまとめた。

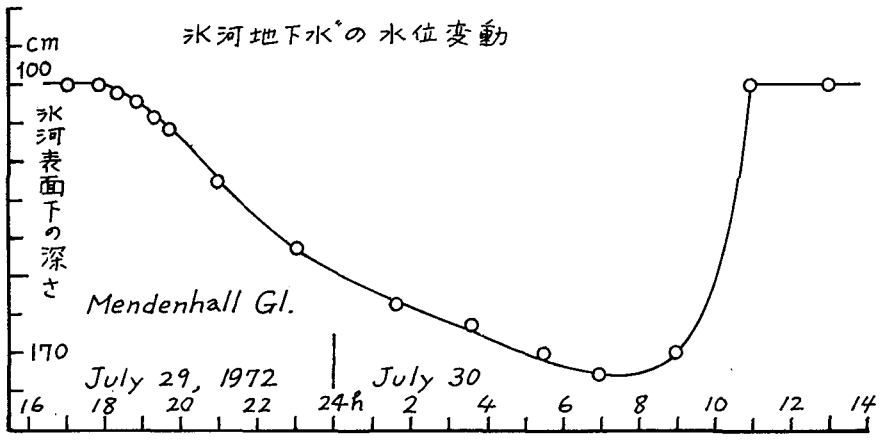
第 1 表　メンデンホール氷河における氷の透水係数 k と水位 D (表面下 cm)

日　時	場　所	k (cm/sec)	D (cm)
1971. 7. 31	B-1 点	1×10^{-3}	87
8. 1	〃	6×10^{-4}	88
8. 1	B-2 点	3×10^{-3}	12
8. 4	B-4 点	2.5×10^{-4}	43
1972. 7. 29	B-2 点に近い所	2×10^{-4}	100
7. 30	〃	3×10^{-3}	100

IV. 氷河地下水位の日変動

前節では，氷河地下水の水位が，常にある一定の深さに保たれているとしてきた。氷河内部の水は，もともと，表面でできた融解水が浸透したものである以上，表面の融解速度の大小その他を反映して，水位も変動する可能性がある。事実，1971 年に B-1 点に掘ったボーリン

グの孔の水位が，8月4日午前10時20分の深さ230 cmから午後3時34分の深さ58 cmまで上昇していた。そこで1972年7月29日から30日にかけてボーリング孔内の水位変化を連続観測した。**第2図**にその結果を示す。7月29日の日中の水位，深さ100 cmが，日が傾いた午後6時近くから低下しはじめ，翌朝7～8時に最低水位175 cmに達した。日が高くなるにつれて水位は急速に上昇，午前11時には前日の水位にまで回復した。7月31日の午前9～11時の間も7月30日朝と全く同じ速度で水位が回復したが，この日は深さ130 cmで水位の上昇が止った。



第2図 氷河地下水の水位の日変動。メンデンホール氷河下流部。1972年7月29日から30日に観測

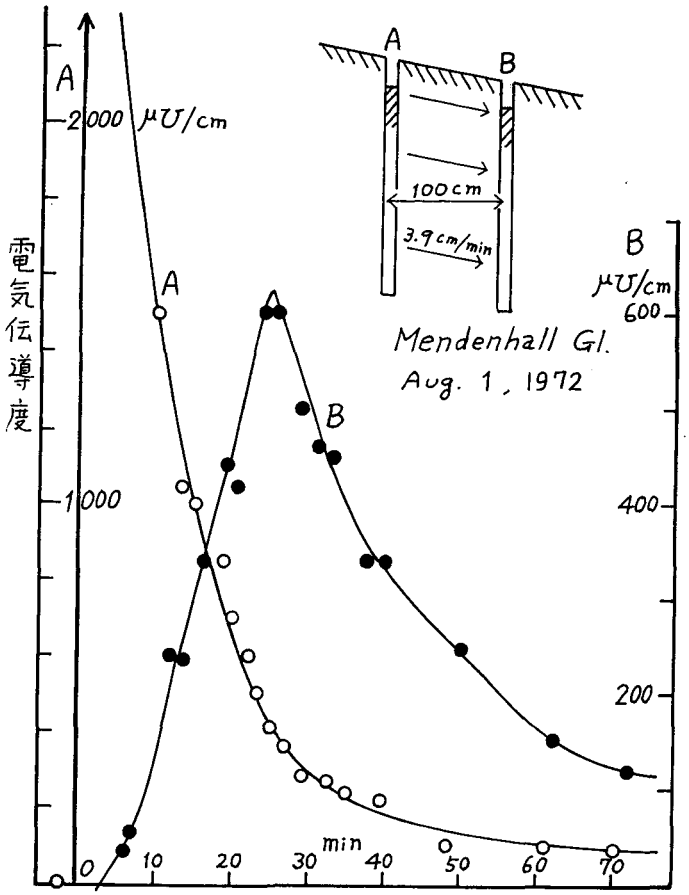
この観測結果から，氷河地下水の水位は日変化し，日射量や気温の変化，つまり表面の融解速度に忠実に従って変動していることがわかる。これは，氷河氷体の通水性が一般に予想されているよりも遙かによい事を示すひとつの証拠である。

V. 氷河内浸透水の流速

氷河表面は多かれ少なかれ傾斜しているので，扇状地の中を地下水がゆっくりと流れるように，氷河内浸透水も第II節でのべたように氷河内部を下流側に流れている。そこで，メンデンホール氷河下流域で水理学における2本オーガー法を利用して氷河浸透水の流速の測定を試みた。

第3図の上方に模式的に示したように，B-2点，最大斜度5°の氷河上で1 mの間隔をおいて，孔A，Bを掘った。両孔とも，ほぼ水で充たされた。上流側の孔Aに水に溶かした電解質（1971年はNaCl 15 g, 1972年はHCl 15 cc）を投入し，孔の中の水を長い棒で充分よく攪拌する。同時に，両方の孔から採取した水の電気伝導度を時々刻々測定する。

第3図に，一例として1972年8月1日に得た結果を示した。細い実線の曲線Aは，上流側の孔A内の水の電気伝導度を示す。投入直後には8,000 $\mu\mho$/cmに達した伝導度σが，時間の経過と共に次式に従って指数関数的に減少した。



第3図　2本オーガー孔法による氷河内滲透氷の流速の測定。上流側の孔Aに電解質を投入後の孔A，Bにおける氷の電気伝導度の変化を示す

$$\sigma = \sigma_0 e^{-(t/\tau)}$$

孔の水の電気伝導度の減少が，電解質の拡散で起ったと考えられるので，時定数τは拡散速度の目安を与える。第3図のばあいτは11分であるが，1971年に行なった同様の測定では24分，38分が得られた。

一方，下流側の孔B内の水の電気伝導度は，電解質を孔Aに投入してから5分後に急増しはじめ，投入27分後に最大値に達したのち，指数関数的に減少した（τは28分であった)。これから得られる電解質の先端速度v_1は，$v_1 = 100$ cm/5min $= 20$ cm/min $= 0.33$ cm/sec であり，また，平均流速v_mは，$v_m = 100$cm/27 min $= 3.9$ cm/min $= 0.065$ cm/sec である。1971年のばあいはこれよりおそく，先端速度$v_1 = 7$ cm/min，平均流速$v_m = 2.1$ cm/min であった。

以上のべた現象は，氷河地下水の一般流に電解質の拡散が重畳したものである。これは，川に電解質を投入して，流速を測るばあいや，融けつつある積雪表面に電解質を散布して融雪水の流下速度を求めるばあいと原理的に同じである[7]。そこで，これらの問題との類推から，電解質の氷河内部における拡散係数Dを求めると，1～2.5 cm/secが求められる。

VI. 氷河融解水の電気伝導度

氷河の源流部で積雪から氷化した氷は，長月日かかって氷河末端に到達する間に不純物が氷体外に排出されて純化するといわれる。

それでマッコール氷河の源流部，中流部および末端部で氷河表面を流れるとけ水，および単結晶氷をとかして得た水の電気伝導度を測定した。電気伝導度は水の純度を示す良い指標となるからである。

メンデンホール氷河でも，下流部の表面に見られるとけ水，および直径5～10 cm の巨大単結晶氷をとかして得た水について同じ測定を行なった。測定には市販の携帯用電気伝導度計(東亜電波製 CM-3M 型) を用いた。

マッコール氷河の源流部では，とけ水もフイルンをとかした水も1～2 $\mu\sigma$/cm の伝導度であった。これはイオン交換水の伝導度に相当する。末端部ではとけ水で1 $\mu\sigma$/cm，単結晶をとかした水で0.5 $\mu\sigma$/cm で，源流部よりも小さい値が得られた。

メンデンホール氷河下流部では，表面を流れるとけ水も，深さ3 m までのコアー試料を融かして得た水も，伝導度は0.5 $\mu\sigma$/cm のていどであった。土砂を含むとけ水でも，せいぜい1 $\mu\sigma$/cm で，非常に純度の高い水であることがわかった。

VIII. ま と め

氷河内部に融け水が浸透・流通していることは，すでに筆者らによって1968年3月，メンデンホール氷河で観測されたが，今回は，氷河浸透水の水量が最も豊富と思われる真夏にその実体を調査した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 氷河内部には，あたかも土壌中に地下水が存在するように，大量の水が存在している。これを仮に氷河地下水と名付けた。氷河地下水の水位は，場所と時刻で異なるが，日中では，表面下10～100 cm のことが多い。

(2) 氷河地下水の水位は日変動しており，明け方に最低水位が観測された。これは，夜間における融解速度の低下が，氷河地下水量に敏感にひびいて，水位の低下をもたらした事を示す。これはまた，氷河氷体内の通水性が良い事を示すひとつの証拠である。

(3) 氷河内における水は，氷河の傾斜にそって下流側に流れていることが，色水法で観測された。二本ボーリング孔法によって流速を求めたところ，平均流速として2～4 cm/min が得られた。また，NaCl, HCl などの電解質の氷河氷内における拡散係数は1～2.5 cm^2/sec であった。

(4) ボーリング孔法によって氷河氷の透水係数を求めたところ，10^{-4}～10^{-3} cm/sec が得られた。これは粗いシルト又は細かい砂の透水係数に相当する。

(5) 氷河内に水が浸透・流通する通路を調べた結果，氷河氷の三叉結晶粒界に沿って，太さ1 mm ていどの毛管水路が網状に連結しているのを発見した。氷河内部に縦横に走るこれら毛管水路を通って，融け水が浸透・流下する。この他，氷河内の剪断破砕面に沿って水が流れる事も確認された。

(6) 氷河のとけ水の電気伝導度は，上流部で 1～2 μσ/cm，下流部で 0.5 μσ/cm のていどで，氷河氷が年月と共に純化していることがわかった。

この研究は，日本学術振興会が主管する日米科学協力事業の下に行なわれ，研究費は日本学術振興会から支出された（研究番号 4R 007，昭和 46-47 年）。

現地での調査に協力してくれたアラスカ大学地球物理学研究所の C. S. ベンソン博士，D. トラバント，C. ファール両氏，ミシガン州立大学雪氷山岳研究所長 M. M. ミラー博士，米国林野庁林務官 L. ジャック氏に深く感謝の意を表わす次第である。

文　献

1) Paterson, W. S. B. 1969 The Physics of Glaciers. Pergamon Press, Oxford. 247 pp.
2) 若浜五郎・高橋　劭 1969 アラスカの雪氷調査. 低温科学，物理篇，**27**，195-212.
3) 高橋　劭・若浜五郎 1970 冬期におけるメンデンホール氷河調査. 低温科学，物理篇，**28**，105-111.
4) Nye, J. F. and Mae, S. 1972 The effect of non-hydrostatic stress on intergranular water veins and lenses in ice. *J. Glaciol.*, **11**, 81-101.
5) Fisher, J. E. 1963 Two tunnels in cold ice at 4000 m on the Breithorn. *J. Glaciol.*, **4**, 513-520.
6) Kirkham, Don 1954 Measurement of the hydraulic conductivity of soil in place. Symposium of Permeability of Soils. ASTM Special Technical Publication. **163**, 86-89.
7) 藤野和夫 1968 積雪内部での融雪水の流下速度の測定，I. 低温科学，物理篇，**26**，87-100.

Summary

Although the importance of melt-water permeating through a glacier body has recently been much discussed in conjunction with the glacier gliding and glacier surge[1], very few observations have been made *in situ* on the behaviour of melt-water in a glacier body. At the beginning of March, 1968, one of the present authors (GW) observed that much melt-water was permeating through the glacier body of the Mendenhall Glacier in the southeast Alaska where the air temperature often went down to the melting point of ice[2),3)]. A boring was made down to a depth of 7 m at a site, 1.5 km from the terminus of the glacier. The melt-water oozed out from the entire wall of the bore-hole and gradually filled it. The water was bailed out of the hole and the ascending speed of the water head in the hole was measured. By the aid of the theory on the hydraulic conductivity of soil used in soil science, the coefficient of water permeability of the glacier ice mass was calculated as 6×10^{-6} cm/sec, which is equivalent to that of compact silt.

In the summers of 1971 and 1972, the behaviour of melt-water which permeates through a glacier body was studied on the same area of the Mendenhall Glacier where a similar observation was made in 1968 (Plate I-1). This paper shows the observed data of water permeability, flow speed of melt-water through the glacier body in the ablation season and the textures of water-tubes developed in the glacier body.

Borings were made in three selected areas as the lower reach of the glacier: a flat and wide area (Site B-1), a slightly concaved area near a pond (Site B-2) and a top of a glacier ice ridge (Site B-4). Melt-water came out very fast from the wall of each

bore-hole and filled up the hole within several minutes. The ascending speed of the water head in these three holes was much faster than that observed in the early spring of 1968. A stable water head in the glacier body was usually found at a depth of 10–40 cm below the glacier surface. This strongly suggests that the melt-water fills up all of voids in the glacier body similarly to the "ground water" within the soil. Unexpectedly melt-water came out fairly quickly from the wall of the bore-hole made at the top of an ice ridge (Site B-4), and the water head reached at a depth of 45 cm below the surface. A typical relation between the ascent of the water head in the bore-hole and time is shown in Fig. 1. Applying Don Kirkham's formula used in the ground water theory, the coefficient of water permeability, k, of the glacier body was calculated and summarized in Table 1. The value of k obtained in summer was of the order of 10^{-3} cm/sec in flat and concaved areas and 10^{-4} cm/sec at an ice ridge, which are equivalent to that of fine grained sand. These values of water permeability were several hundreds times larger than those obtained in early spring of 1968.

In order to observe how melt-water permeates through the texture of the glacier body, an ice pit, 60 cm deep and 150 cm wide, was dug in the glacier, and a small amount of ink was sprayed on the surface of the glacier 100 cm upstream from the pit wall. The permeation of ink through the texture of glacier ice is seen in Plate I-2: some amount of the ink flowed through a large number of water-tubes and partly through foliation planes which have high permeability. This affords evidence that a lot of melt-water is permeating through the whole body of a temperate glacier.

A large block of ice was cut out from a wall of the pit and placed on the glacier surface. Melt-water contained in the ice block flowed out through water-tubes within the ice and soon networks of the water-tubes became visible because of introduction of air in them as illustrated in Plate I-3. A careful inspection indicated that most of the water-tubes existed at sites of the triple boundary where three ice grains meet[4]. The average diameter of the water-tubes was 1–1.5 mm. Fine networks which consisted of capillary water-tubes (less than 0.1 mm in diameter) were also found along a grain boundary between two ice grains. A vertical thin section of ice containing a foliated layer composed of fine grains was cut out from a wall of the pit, and examined under a polarized light (Plate I-4, the arrow indicates upward). In the foliated layer F–F in this photograph, many water tubes and capillaries were found suggesting high permeability of melt-water.

A direct measurement of the flow speed of melt-water through the glacier body was made by the use of the "two-bore-holes technique" as schematically shown in the upper part of Fig. 3. About 100 g of water saturated with NaCl were poured into the water in the upper hole "A", and then the water was rapidly stirred by an auger-rod to make it homogeneous. The electric conductivity of the water taken from bore holes "A" and "B" was measured with time. The value of conductivity of the water taken from hole "A" decreased exponentially with time as shown by curve "A" in Fig. 3. The value of conductivity of the water taken from hole "B" began to increase about 4 minutes after the pouring of the salt solution into hole "A". As shown in Fig. 3, the maximum of curve "B" appeared in 27 minutes after the experiment was began. From this observation the average flow speed of melt-water in the glacier

body was estimated to be 2–4 cm/min.

The water head within the glacier body was measured throughout day and night to investigate its diurnal variation. It was found that the water head gradually descended with time after the sunset and ascended very rapidly with time after the sunrise as shown in Fig. 2. The minimum water head was found at 7 o'clock in the morning, and the difference between the maximnm and minimum heads was 76 cm. The observed diurnal variation of the water head in the glacier body suggests that the amount of water permeating through the glacier body must primarily depend on the rate of melting of ice at the surface of the glacier.

図 版 説 明

1: メンデンホール氷河下流部。観測は矢印の附近で行なわれた。

2: 氷河表面 A-A 線に沿って散布したインクが，氷河内部を通って，下流側に掘った穴の壁に滲み出したところ。

3: 氷河氷の内部の毛管水路網。黒い部分が氷で，その中にみられる無数の白く輝く小斑点はチンダル像である。多くの毛管水路は3個の結晶粒のなす三叉粒界に沿って走っている。スケールは一刻みが1 cm。

4: 氷河内で特に水をよく通す片理面 F-F を含む薄片の偏光写真。この片理面は粒径が非常に細かい薄い層で，剪断破砕帯と考えられる。白い矢の方向が鉛直上方。

1
2
A
A
30 July 1972
Pit site
NEMENHAUI
GLACIER
3
4
T
T